

## Биомедицинские приборы и системы

УДК 615.816

О.К. Боділовський, А.О. Попов, канд. техн. наук

### Побудова системи штучної вентиляції легень

В роботі розглянуто основні принципи побудови замкнутих систем вентиляції, що існують на сьогоднішній день. Запропоновано структуру замкнутої системи з використанням зворотних зв'язків по сигналам сатурації крові киснем (SpO<sub>2</sub>) та концентрації вуглекислого газу в кінці видиху PetCO<sub>2</sub>. Визначено шляхи удосконалення існуючих систем ШВЛ.

In this paper the basic principles of closed loop mechanical ventilation systems that exist today are presented. The new structure of a closed-loop mechanical ventilation system using SpO<sub>2</sub> and PetCO<sub>2</sub> feedback signal analysis is proposed. The ways of improvement of mechanical ventilation systems are defined.

**Ключові слова:** ШВЛ, замкнуті системи штучної вентиляції легень

#### Вступ

Анестезіологія та інтенсивна терапія – галузь сучасної медицини, яка найбільш стрімко розвивається та фінансується. Увага дослідників з усього світу приділяється апаратам штучної (допоміжної) вентиляції легень (ШВЛ) як основного засобу підтримки в реанімації та інтенсивній терапії. Як і у багатьох галузях сучасної медицини, при розробці систем ШВЛ маємо випадок, коли технічні засоби випереджають у своєму розвитку існуючу методологію. Саме тому провідні виробники медичної техніки роблять акцент на алгоритмах та режимах проведення респіраторної підтримки. Вінцем технологічної думки є прилади, які являють собою замкнуту систему вентиляції, що сама встановлює оптимальні параметри в залежності від життєвих показників пацієнта. Проте на сьогоднішній день не існує режиму вентиляції, який би повністю відповідав потребам фізіологічного газообміну. Через це подальші дослідження в галузі розробки систем та методів респіраторної підтримки є актуальною задачею [1-2]. Метою даної роботи є дослідження сучасного стану розвитку замкнених систем штучної вентиляції легень, визначення їх переваг та недоліків, обґрунтування та побудова структурної схеми системи штучної

вентиляції легень та окреслення кола практичних задач, які потрібно вирішити в майбутньому.

#### Класифікація систем штучної вентиляції легень

Сьогодні на ринку медичної техніки для інтенсивної терапії присутні апарати штучної вентиляції легень, які побудовані за різними принципами. Кращими вважаються системи з адаптивними алгоритмами керування, які можуть пристосовуватися до постійних змін дихальної системи пацієнта і надавати саме ту підтримку, що необхідна на даний момент. В основу побудови систем адаптивної штучної вентиляції легень покладено принцип системи із інформаційним зворотнім зв'язком, яка контролює цільові параметри режиму вентиляції в залежності від показників дихання пацієнта. Ці системи відрізняються за своєю структурою, алгоритмом функціонування, а також за параметрами, які використовуються в зворотних зв'язках. Умовно виділяють наступні структури апаратів штучної вентиляції легень [1, 3-7]:

1. Система з регулюванням встановлених параметрів (Setpoint Control) (Рис.1)

В такій системі характерним є те, що оператор встановлює межі контрольної величини. При цьому апарат ШВЛ може виконувати контроль по тиску чи по потоку. Зазвичай для контролю заданого параметру використовують алгоритм ПІД-регулювання. Наразі всі сучасні апарати ШВЛ можуть виконувати даний тип регулювання.



Рис. 1. Система з регулюванням встановлених параметрів

2. Система з авторегулюванням встановлених параметрів (Auto-Setpoint Control)

Система підтримує встановлені оператором параметри, проте може перемикатися на підтримку більш важливого параметру у відповідності до встановлених пріоритетів. Наприклад, можливо виконувати перехід від підтримки по тиску на підтримку по потоку для

забезпечення заданого хвилинного об'єму. Даний алгоритм реалізовано в режимі вентиляції VAPS (Volume Assured Pressure Control) на апараті Bird 8400.

3. Слідкуюча система регулювання (Servo Control) (Рис. 2)

Система регулювання відтворює параметр вихідної величини, що довільно змінюється. Це робить можливим не тільки штучну примусову вентиляцію, а й підтримку власних дихальних спроб пацієнта. В системі з даною структурою регулювання реалізовується режим вентиляції PAV (Proportional Assist Ventilation), який передбачає постійну взаємодію з пацієнтом і оцінку стану його дихальної системи. Цей режим має ряд переваг, зокрема, підлаштовуючись під пацієнта, дозволяє врахувати при виборі параметрів вентиляції його самостійні дихальні спроби. Існує можливість обирати максимальний тиск, час вдиху, час видиху, та хвилинний об'єм. Суттєвими недоліками такої системи є ризику виникнення баротравм у разі неправильного визначення еластансу та резистивності дихальних шляхів.

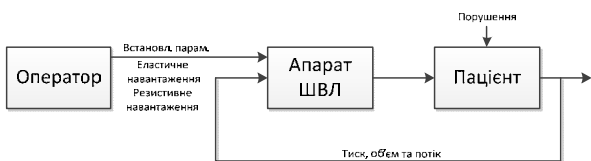


Рис. 2. Слідкуюча система регулювання

4. Система з адаптивним регулюванням (Adaptive Control) (Рис. 3)

В даній системі оператор обирає цільовий параметр, який треба підтримувати, а саме хвилинний об'єм повітря. Система підтримує тиск або потік повітря для підтримки заданого хвилинного об'єму. Одним з перших прикладів, що реалізує адаптивне регулювання, був апарат Servo від Siemens з режимом контролю об'єму з регулюванням по тиску [4]. Даний алгоритм був наступною віхою еволюції при побудові замкнених систем вентиляції, адже він дозволяв визначати необхідний рівень контрольованого параметру незалежно від установок оператора. На відміну від системи регулювання встановлених параметрів дана система, завдяки додатковому зворотному зв'язку по об'єму видиху, дозволяє вираховувати параметри легеневої механіки не тільки на стадії вдиху.

5. Система з оптимальним регулюванням (Optimal Control) (Рис. 4)

Дана система не потребує безпосереднього введення оператором всіх параметрів вентиляції, необхідно вказати основні характеристики пацієнта (зокрема, вагу) пацієнта для того, щоб апарат самостійно визначив більшість

параметрів вентиляції (хвилинний об'єм, оптимальний інспіраторний тиск та частоту дихання) [2]. В цій системі вирішується задача оптимізації для встановлення потрібних параметрів роботи системи ШВЛ. Одним з перших приладів, де почали використовувати даний алгоритм регулювання, був апарат ШВЛ Galileo фірми HAMILTON MEDICAL [5]. Незважаючи на високу ступінь автоматизації процесу вентиляції, все ж велика кількість параметрів (таких як позитивний тиск кінця видиху (ПТКВ), фракція кисню у суміші (FiO2), та межі тривоги) встановлюються оператором вручну.

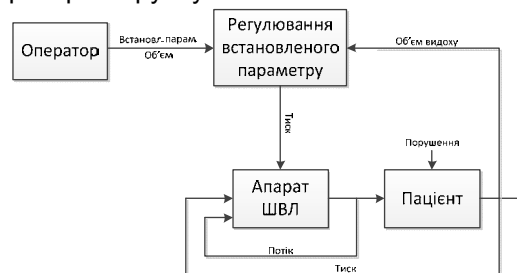


Рис. 3. Адаптивна система регулювання



Рис. 4. Система з оптимальним алгоритмом регулювання

6. Інтелектуальна система регулювання (Knowledge-Based Control) (Рис. 5)

Інтелектуальна система регулювання є складнішою за попередні, оскільки використовує при визначенні параметрів вентиляції зворотні зв'язки по показникам, які дають більш чітке уявлення не тільки про стан легеневої механіки пацієнта, а й про ефективність газообміну в його організмі. Даний тип регулювання до недавнього часу існував тільки у вигляді концепції, над реалізацією якої працюють всі виробники апаратів ШВЛ, але на ринку дані системи ще не представлені. Використання нечіткої логіки в інтелектуальних системах регулювання має ряд переваг. Зокрема, спрощується визначення та формалізація правил керування, які можуть бути описані у формі, близької до звичайної мови, що дає можливість будувати систему, використовуючи знання фахівців з медицини [6].



Рис. 5. Система з інтелектуальним режимом регулювання

7. Система регулювання за допомогою нейронних мереж (Artificial Neural-Net Control) (Рис. 6)

В даній системі нейронна мережа використовується для вироблення рекомендацій оператору по встановленню параметрів ШВЛ на основі вимірних характеристики дихання пацієнта. Такі системи не реалізовані серійно, а існують лише у вигляді прототипів, в яких нейронна мережа використовується як експертна система для допомоги в прийнятті рішення оператором [7]. Безперечно найбільшою перевагою систем на основі нейронних мереж є здатність до навчання, що спрощує перетворення знань, якими володіє лікар (і які часто є надбанням власного досвіду) в формалізовані правила налаштування систем ШВЛ. Проте суттєвим недоліком можна вважати прихований характер роботи такої системи, що обмежує її використання в системах життєзабезпечення. Невідомо, за якими принципами нейронна мережа приймає рішення щодо рекомендації тих чи інших режимів та параметрів, що може бути потенційно небезпечним, наприклад, у випадку виникнення нестандартних ситуацій.

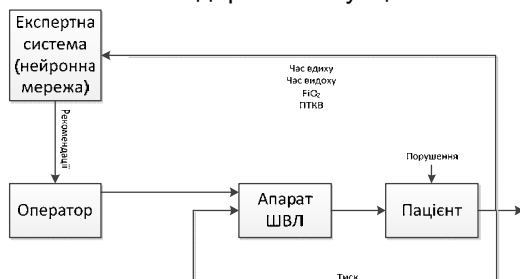


Рис. 6. Система на основі нейронної мережі

### Порівняння систем керування апаратів ШВЛ

Респіраторна підтримка доволі складна галузь сучасної медицини, яка знаходиться на межі багатьох наук до того ж не тільки медичних, а й технічних. Лікар, який проводить штучну вентиляцію легень повинен бути висококваліфікованим фахівцем, який окрім медичних аспектів повинен мати знання з основ

електроніки та пневматики. Повертаючись до систем керування варто зазначити, що реалізація алгоритмів в багатьох випадках потребує не тільки спеціального програмного забезпечення апарату ШВЛ, а й додаткових сенсорів, як у випадку з інтелектуальними режимами вентиляції. Наприклад, в 2011 році компанією HAMILTON MEDICAL анонсовано апарат штучної вентиляції легень S1 з режимом INTELLIVENT-ASV [8], який може автоматично підлаштовувати параметри хвилинного об'єму вентиляції, ПТКВ, та FiO2. В якості сигналу зворотного зв'язку додатково використано показники пульсоксиметрії та капнографії, по яким і відбувається вибір хвилинного об'єму та FiO2. Сам алгоритм, що використовує виробник, є комерційною таємницею.

Наведені вище системи мають свої переваги та недоліки і чогось універсального до сьогодення не створено. Але всі виробники систем ШВЛ працюють над покращенням існуючих приладів та над пошуком нових концепцій побудови систем ШВЛ. Сучасний стан речей в галузі виробництва техніки ШВЛ такий, що приладів, які забезпечують заданий хвилинний об'єм з урахуванням стану дихальної механіки пацієнта, достатньо. На базі таких апаратів без використання додаткового апаратного забезпечення можливо реалізувати перші п'ять систем в класифікації наведеній вище. Але все більше виробників схильються до ідеології інтелектуальних систем, основною метою яких є зведення до мінімуму негативних наслідків проведення ШВЛ, а також, найголовніше – відслідковування стану пацієнта по додатковим параметрам для вибору найбільш оптимального режиму вентиляції на даний момент. Такі системи можуть використовувати сенсори SpO2, PetCO2, сигнали електрокардіограми, електроенцефалограми, електроміограми, сигнали з дихального центру та ін. У випадку використання більш широкого ряду параметрів, ми отримуємо інформацію про ефективність вентиляції, а саме про перебіг газообміну в організмі пацієнта та вплив ШВЛ на інші системи організму. Окрему увагу необхідно звернути на зрозумілість та прозорість системи керування, що у випадку використання в системах життєзабезпечення має вирішальну роль. Саме ця вимога і стримує використання систем на основі нечіткої логіки та нейронних мереж в медичних приладах. Тому на сьогоднішній день в більшості систем використовуються оптимізаційні алгоритми керування, які не завжди забезпечують необхідні комфортні умови дихання для пацієнта, а зазвичай запобігають виникненню якогось одного не-

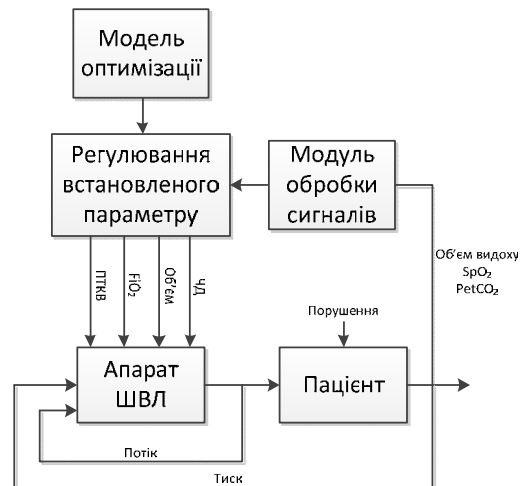
гативного наслідку вентиляції (наприклад при мінімізації тиску зменшується вірогідність баротравми, при цьому виникнення волюмотравми не виключено).

Отже, для побудови системи вентиляції необхідно враховувати багато параметрів, що суттєво ускладнює керування такою системою. Також необхідно виконувати більш якісну обробку та детальний аналіз сигналів, які вимірюються зараз з метою знаходження показників, що будуть відповідати за декілька систем організму одночасно. Це дозволить спростити систему керування, але при цьому адекватно враховувати стан пацієнта.

**Принципи побудови системи штучної вентиляції легень**

Виходячи з аналізу існуючих систем ШВЛ та їх недоліків і переваг, пропонується будувати системи ШВЛ з урахуванням таких рекомендацій (рис. 7). Дана система виконує регуляцію по сигналам SpO2 та PetCO2. Інформація, що надійшла від сенсорів, потрапляє на блок обробки інформації, де відбувається її аналіз. Знайдені в результаті аналізу додаткові характеристики сигналу подаються на блок регулювання та вибору параметрів, який контролює апарат ШВЛ у відповідності до обраної моделі оптимізації параметрів вентиляції. Система штучної вентиляції має містити експертну систему, на основі рекомендацій якої оператор буде приймати рішення про вибір режиму та установку тих чи інших параметрів вентиляції. В подальшому необхідно створити повністю замкнуту систему вентиляції, яка потребуватиме тільки введення початкових умов які будуть описувати характер травми пацієнта. Основний акцент необхідно робити на удосконаленням модуля обробки та аналізу сигналів, який має визначати необхідні для роботи експертної системи характеристики пацієнта. Також важливим є створення прозорішої та стабільнішої системи в порівнянні з системами на основі нечіткої логіки та нейронних мереж, що безперечно наблизить даний апарат до застосування в клінічних умовах.

Основною метою ШВЛ є підтримання необхідного рівня насичення киснем всіх тканин і органів організму, а також забезпечення виведення із організму вуглекислого газу. Через це основну увагу при побудові систем адаптивної ШВЛ необхідно сконцентрувати саме на тому, щоб цільовими параметрами регулювання були саме концентрації цих газів. Цей напрямок досліджень є перспективним, і задачами роботи в цьому напрямку такі:



**Рис. 7. Система регулювання зі зворотнім зв'язком по сигналам SpO2 та PetCO2**

1. Розвиток методів моделювання сигналів SpO2 та PetCO2. Зараз відсутні математичні моделі для даних сигналів, але їх використання дасть змогу створити більш гнучкі алгоритми аналізу та ідентифікації стану пацієнта. Створені моделі сигналів будуть використані для дослідження нових методів та алгоритмів аналізу даних вимірювань SpO2 та PetCO2, а також випробувань експериментальних зразків створеної апаратури ШВЛ.

2. Залучення класичних та нових методів аналізу сигналів до вивчення часових властивостей SpO2 та PetCO2 при моніторингу стану пацієнта та при адаптивному налаштуванні режимів та параметрів ШВЛ. Критерієм вибору має бути відповідність часових характеристик аналізованих сигналів та властивостей базисних функцій в розкладі. До найбільш перспективних перетворень сигналів можна віднести перетворення Уолша та вейвлет-перетворення з використанням материнської функції Хаара. Нові методи аналізу сигналів SpO2 та PetCO2 дадуть нові характеристики сигналів, що допоможуть надавати адекватну до фізичних потреб пацієнта підтримку.

3. Використання для визначення оптимального базису розкладу існуючих формальних методів вибору базису, зокрема метод «пошуку найкращого базису». Це дасть змогу проводити адаптивні розклади сигналів для їх найбільш адекватного представлення, архівації та передачі по телемедичним каналам зв'язку.

4. Визначення можливості використання результатів аналізу сигналів SpO2 та PetCO2 для дослідження впливу ШВЛ на стан легень та інші показники життєдіяльності людини (гемодинаміку, наповненість судин кров'ю, серцевий викид). Наразі таким дослідженням

приділяється недостатньо уваги, можливо через те, що математичні методи аналізу сигналів SpO<sub>2</sub> та PetCO<sub>2</sub> знаходяться на початковому етапі.

5. Розробка моделі системи аналізу сигналів та адаптивного вибору режимів та параметрів вентиляції. Реалізація такої моделі дасть змогу провести попередні дослідження роботи системи в різних режимах та попередньо відлагодити її перед клінічними випробуваннями.

### Висновки

В роботі представлено класифікацію структур побудови систем ШВЛ та вказано їх переваги і недоліки. Основним напрямком досліджень для розвитку систем ШВЛ визначено удосконалення існуючих та залучення нових методів аналізу сигналів SpO<sub>2</sub> та PetCO<sub>2</sub> з метою отримання інформації для вибору параметрів та режимів ШВЛ. Запропоновано структуру побудови системи адаптивної ШВЛ, яка реалізує обробку та аналіз сигналів внутрішнього дихання та об'єднує в собі переваги, існуючих зараз систем.

### Літератури

1. *Tobin, M.J.* Principles and practice of mechanical ventilation / M.J. Tobin. – McGraw-Hill, Inc., 2006. – 1436 p.
2. *Сатишур, О.Е.* Механическая вентиляция легких / О.Е. Сатишур. – М. : Мед. лит., 2006. – 352 с.
3. Специфікація апарату штучної вентиляції легень Bird 8400 STI ventilator. Режим доступу до ресурсу: [http://www.dremed.com/catalog/product\\_info.php/cPath/45\\_184/products\\_id/1891](http://www.dremed.com/catalog/product_info.php/cPath/45_184/products_id/1891)
4. Специфікація апарату штучної вентиляції легень Servo Ventilator 900 C. Режим доступу до ресурсу: <http://www.medical.siemens.com/webapp/wcs/stores/servlet/ProductDisplay?productId=16817&storeId=10001&langId=-1&catalogId=-1&catTree=100001>
5. Специфікація апарату штучної вентиляції легень GALILEO ventilator. Режим доступу до ресурсу: <http://www.hamilton-medical.com/GALILEO-ventilators.37.1.html>
6. *Nemoto, T.* Automatic Control of Pressure Support Mechanical Ventilation Using Fuzzy Logic / Tadashi Nemoto, George E. Hatzakis, C. William Thorpe, Ronald Olivenstein, Sandra Dial, And Jason H. T. Bates // American Journal Of Respiratory And Critical Care Medicine. – 1999. – Vol. 160. – P. 550 – 556.
7. *Zhu, H.* Ventilator Control Based on a Fuzzy-Neural Network Approach / Hui Zhu, Knut Möller // Bioinformatics and Biomedical Engineering. ICBBE 2008. – Shanghai (China), 2008. – P. 747 – 750.
8. Опис особливостей режиму вентиляції INTELLiVENT-ASV
9. Режим доступу до ресурсу: <http://www.hamilton-medical.com/INTELLiVENT-ASV.1053.0.html>